中国生态农业学报 2017 年 6 月 第 25 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2017, 25(6): 829−838

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160836

黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 张木, 黄旭, 黄建凤, 李苹, 付弘婷. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 829−838

Huang Q Y, Tang S H, Zhang F B, Zhang M, Huang X, Huang J F, Li P, Fu H T. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 829−838

减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响*

黄巧义, 唐拴虎**, 张发宝, 张 木, 黄 旭, 黄建凤, 李 苹, 付弘婷

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室 广州 510640)

摘 要: 以释放期为 60~90 d 的控释尿素为试验材料, 2015 年在广东省台山市和翁源县开展大田试验, 研究在全量施氮[195 kg(N)·hm^{-2}]、减氮 20%[156 kg(N)·hm^{-2}]和减氮 40%[117 kg(N)·hm^{-2}]条件下, 常规分次施肥(CF)、配施控释尿素氮占 25%一次性施用(25%CRU)和配施控释尿素氮占 50%一次性施用(50%CRU)对水稻生长、产量及氮肥利用率的影响, 为控释尿素在水稻生产上的推广应用提供参考。结果表明, 在水稻营养生长阶段, 不同施氮处理的每兜分蘖数基本一致, 叶片 SPAD 值随施氮量增加略有提高。随着施氮量增加, 水稻产量先提高后降低, 当施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2} 时, 水稻产量最高。等氮条件下, 25%CRU、50%CRU 和 CF 处理的水稻籽粒产量基本一致; 不同施氮处理的稻谷和稻草氮素吸收累积量无显著差异。水稻氮素吸收累积量随着施氮量的增加而增加, 而氮肥偏生产力和氮收获指数逐渐降低。等氮条件下, 25%CRU 和 50%CRU 处理的氮肥农学效率、氮肥生理利用率均显著高于常规施肥处理(P<0.05), 两地平均增幅分别为 14.99%、17.23%和 98.22%、57.44%。当施氮量为 195 kg(N)·hm^{-2} 时, 25%CRU 和 50%CRU 处理的氮收获指数较常规施肥处理(CF)提高 6.99%和 6.69%, 其中台山试验点的增幅达到显著水平(P<0.05)。117 kg(N)·hm^{-2} 处理的土壤碱解氮含量显著降低(P<0.05)。25%控释氮肥掺混一次性施用施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2} 的施肥处理, 其产量和氮肥利用效率在台山和翁源两个试验点均较高, 在广东省双季稻区可实现水稻增产稳产, 显著提高氮肥利用率, 并维持土壤肥力, 是一种较优的氮肥运筹模式。

关键词: 水稻; 控释肥; 一次性掺混; 减氮; 氮肥利用效率; 养分吸收; 产量

中图分类号: S145.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)06-0829-10

Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice*

HUANG Qiaoyi, TANG Shuanhu**, ZHANG Fabao, ZHANG Mu, HUANG Xu, HUANG Jianfeng, LI Ping, FU Hongting

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture / Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of different blending rates of controlled-release urea (CRU) and conventional urea (CU) at different nitrogen

---

* 农业部公益性行业(农业)科研专项(201303103, 201503123)和广东省科技计划项目(2016A020210035, 2014B090904068)资助
** 通讯作者: 唐拴虎, 主要从事新型肥料及植物营养研究。E-mail: 1006339502@qq.com
黄巧义, 主要从事土壤培肥及高效施肥技术研究。E-mail: huangqiaoyi@hotmail.com
收稿日期: 2016-09-17 接受日期: 2016-12-28

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303103, 201503123), and Guangdong Province Science and Technology Planning Project (2016A020210035, 2014B090904068).
** Corresponding author, E-mail: 1006339502@qq.com
Received Sep. 17, 2016; accepted Dec. 28, 2016

(N) application rates on the growth, yield, N uptake and N use efficiency of rice were studied to provide a reference base for the application and dissemination of CRU in rice production. Field experiments of rice were carried out in Taishan City and Wengyuan County in Guangdong Province during the 2015 rice growing season. Ten treatments were set in the experiment — conventional fertilization with 4 split applications (CF), single basal application of 25% CRU plus 75% CU (25%CRU) and single basal application of 50% CRU plus 50% CU (50%CRU), respectively, under 100%, 80% and 60% of conventional N rate [195 kg(N)·hm^{-2}, 156 kg(N)·hm^{-2} and 117 kg(N)·hm^{-2}], and no nitrogen fertilization (CK). Tiller number and leaf SPAD values were measured at vegetative stages of rice. Straw and grain yield were collected at maturity for N analysis. Then yield and yield components were recorded after harvest. The results showed that there was no difference in tiller number at vegetative growth stages under different N fertilization treatments, and that leaf SPAD increased with increasing N application rate. With increasing N application rate, rice grain yield increased initially and then decreased. Also the highest rice grain yield was obtained under 156 kg(N)·hm^{-2} treatment. N uptake of rice increased with increasing N application. At the same N rate, no differences was noted in grain yield, N uptake of rice grain and rice straw among CF, 25%CRU and 50%CRU treatments. With increasing N application rate, N partial factor productivity and N harvest index decreased gradually. For the same N rate, agronomic N use efficiency, N physiology efficiency under 25%CRU and 50%CRU treatments were higher than that under CF treatment ($P < 0.05$), with average increases of 14.99%, 17.23% and 98.22%, 57.44%, respectively. N harvest indices under 25%CRU and 50%CRU treatments were averagely higher by 6.99% and 6.69%, respectively, than that under CF treatment at conventional application rate [195 kg(N)·hm^{-2}], especially in Taishan City. Soil available N under 60% conventional N rate [117 kg(N)·hm^{-2}] treatment after rice harvest was significantly lower than that under 100% and 80% conventional N rate treatments. In conclusion, rice grain yield and N use efficiency under 25%CRU at 80% conventional N rate in both experiment sites were superior over those under other treatments. Therefore, single basal application of 25%CRU plus 75%CU with N rate of 156 kg(N)hm^{-2} increased rice yield and N use efficiency, and maintained soil N fertility in Guangdong. This was a potential beneficial and rational N application mode for the region.

Keywords: Rice; Controlled-release urea; Basal-blending application; Low nitrogen application; Nitrogen use efficiency; Nutrient uptake; Yield

我国南方双季稻区大部分土壤缺氮，且其高温多雨气候加快了土壤有机氮的矿化速率和氮素损失风险[1-2]。在长期耕作生产过程中，广东双季稻区稻农形成了“一基三追”的施肥模式，然而，该施肥方式存在施肥量偏大，次数多和养分利用率较低的缺陷[3]。氮素科学合理施用是水稻(*Oryza sativa*)高产稳产的有效措施之一[4-5]。由于氮肥在作物生产中的重要作用，我国氮肥用量不断增加[6]。随着化肥用量增加和耕地肥力的逐渐提高，氮肥的增产效率和氮肥利用率则逐年降低[4,6-7]，这不仅造成能源浪费，同时还造成严重的生态环境问题[2,7-8]。因此，减少稻田氮素损失，提高氮肥利用率具有重要意义。

控释氮肥通过各种包膜技术控制养分释放，使其养分供应与作物需求实现同步，是提高肥料利用效率的有效途径，成为国内外研究热点[1,9-11]。大量研究表明，在广东省双季稻区一次性施用控释肥增产效果明显，氮肥利用效率显著提高，并在氮肥减施条件下实现水稻稳产增产[1,10,12-15]。然而，在水稻等大田作物上应用控释肥的成本偏高，严重制约其推广应用[1,11]。研究表明，控释肥与速效肥掺混施用，也能保证作物产量，是控释肥在水稻等大田作物上推广应用的有效途径[11,16-17]。然而，目前双季稻上控释尿素与普通尿素掺混配施比例以及施氮量优化的相关研究尚少，限制了控释尿素与普通尿素配施技术在水稻生产上的应用推广。为此，本试验以 ICL, Specialty Fertilizer 公司的 Agromaster 型控释尿素为供试材料(养分释放期为 60~90 d)，在广东省典型双季稻田开展水稻肥效试验，研究控释肥与速效肥不同掺混比例在不同施氮条件下对水稻生长、氮素累积分配、氮肥利用率以及产量的影响。探索广东省水稻氮肥高效施用途径，为我国氮肥增效减施提供技术储备。

1 材料与方法

1.1 供试材料

田间试验于 2015 年 3 月至 7 月在广东南部江门市台山市都斛镇(112.58°E，22.05°N)和北部韶关市翁源县三华镇(114.03°E，24.18°N)进行。翁源县属中亚热带季风气候，平均气温 20.4 ℃，年降雨量 1 778 mm，无霜期 312 d。台山市属亚热带海洋性季风气候，年平均气温 21.8 ℃，年均降雨量 1 936 mm，无霜期在 360 d 以上。两试验点供试稻田土壤理化性状见表 1。供试控释尿素(CRU)为 ICL, Specialty Fertilizer 公司的 Agromaster 型控释尿素(含 N 43%，养分释放期为 60~90 d)。

表 1　供试土壤基本理化性状

Table 1　Soil properties in the experimental sites

试验点 Experimental site	土壤质地 Texture	pH	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Alkali N ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available P [$mg(P_2O_5)\cdot kg^{-1}$]	速效钾 Available K [$mg(K_2O)\cdot kg^{-1}$]
台山 Taishan	壤质黏土 Loamy clay	5.78	40.86	160.57	18.96	230.67
翁源 Wengyuan	黏壤土 Clay loam	4.98	26.88	173.92	46.43	113.00

1.2　田间试验设计

试验以不施氮为对照，采用完全随机裂区设计，设置常规分次施肥(CF)、配施 25%控释尿素氮一次性施用(25%CRU)和配施 50%控释尿素氮一次性施用(50%CRU)3 种施肥方式作为主区，全量施氮[195 $kg(N)\cdot hm^{-2}$]、减氮 20%[156 $kg(N)\cdot hm^{-2}$]和减氮 40%[117 $kg(N)\cdot hm^{-2}$]3 个施氮量为副区。详细的氮肥施用方案和肥料运筹见表 2。所有处理的磷、钾施用量均为 45 $kg(P_2O_5)\cdot hm^{-2}$ 和 114 $kg(K_2O)\cdot hm^{-2}$，磷肥为过磷酸钙，钾肥为氯化钾，在秧苗移栽前 1 d 做基肥一次性施入。小区土壤先用锄头和铁耙整理平整，控制田间水层高度约为 3 cm，将肥料撒施均匀，然后用铁齿耙及木耙将肥料混入表土中。

表 2　不同试验处理的氮肥方案与肥料运筹

Table 2　Fertilization program and fertilizers application rates and time of different fertilization treatments

处理 Treatment	处理内容 Description of treatment: 施氮 N application	处理内容 Description of treatment: 施肥次数 N application times	处理内容 Description of treatment: 氮肥组成 N fertilizers	施氮量 N application rate [$kg(N)\cdot hm^{-2}$]	氮肥运筹 N application rates at different growth stages [$kg(N)\cdot hm^{-2}$]: 基肥 Basic fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	拔节肥 Jointing fertilizer	孕穗肥 Booting fertilizer
CK	不施氮 No nitrogen			0	0	0	0	0
CF1	常规 Conventional	多次 Multiple	CU	195	87.8 (CU)	39.0 (CU)	48.8 (CU)	19.5 (CU)
25%CRU-1	常规 Conventional	一次 Once	25% CRU + 75% CU	195	48.8 (CRU) + 146.2 (CU)			
50%CRU-1	常规 Conventional	一次 Once	50% CRU + 50% CU	195	97.5 (CRU) + 97.5 (CU)			
CF2	减氮 20% 20% N reduction	多次 Multiple	CU	156	70.2 (CU)	31.2 (CU)	39.0 (CU)	15.6 (CU)
25%CRU-2	减氮 20% 20% N reduction	一次 Once	25% CRU + 75% CU	156	39.0 (CRU) + 117 (CU)			
50%CRU-2	减氮 20% 20% N reduction	一次 Once	50% CRU + 50% CU	156	78.0 (CRU) + 78.0 (CU)			
CF3	减氮 40% 40% N reduction	多次 Multiple	CU	117	52.7 (CU)	23.4 (CU)	29.3 (CU)	11.7 (CU)
25%CRU-3	减氮 40% 40% N reduction	一次 Once	25% CRU + 75% CU	117	29.3 (CRU) + 87.7 (CU)			
50%CRU-3	减氮 40% 40% N reduction	一次 Once	50% CRU + 50% CU	117	58.5 (CRU) + 58.5 (CU)			

U: 尿素; CRU: 控释氮肥。CU: conventional urea; CRU: controlled-release urea.

试验所有处理设 4 次重复，小区面积为 20 m^2，随机区组排列。小区间筑埂后用塑料薄膜包覆隔离，实行单独排灌，防止水、肥渗透。翁源点水稻品种为‘深优 9786’，3 月 30 日移栽，种植密度为 20 cm×20 cm，移栽后灌水使秧苗返青，7 月 14 日收获。台山点水稻品种为‘五山丝苗’，3 月 6 日移栽，种植密度为 18 cm×20 cm，移栽后灌水使秧苗返青，7 月 5 日收获。其他田间管理与大田一致。

1.3　调查测定项目与方法

田间试验开始前采集 0~20 cm 耕层土样，用于测定 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾。在水稻营养生长期(移栽后 40 d 内)每隔 1 周调查各处理分蘖数和叶片 SPAD 值。成熟期每小区采集 5 穴的谷穗样品用于考种，进行水稻产量构成因子评价；并采集代表性植株 2 穴用于生物量及含氮量的测定，测定稻谷和稻草的氮含量。成熟期采集各小区耕层土样，用于全氮和碱解氮测定。各小区单打单晒，分别测产。

生物量测定：样品采集后立即洗净、擦干，将稻谷和稻草分开，在 105 ℃下杀青 30 min，再在 75 ℃下烘干至恒重。

植株含氮量测定：将各处理的茎叶和穗部样品在 85 ℃下杀青 30 min，随后在 75 ℃下烘至恒重，粉

碎后过 0.5 mm 筛，采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，AA3 型自动分析仪测定。

土壤样品经风干过筛后，采用常规土壤农化分析方法进行理化分析[18]。土壤 pH(2.5∶1)用酸度计电位法，有机质用重铬酸钾容量法，土壤碱解氮用碱解扩散法，有效磷用 Olsen 法，速效钾用醋酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.4 计算方法

氮素吸收量及氮素利用效率相关参数[12,17]的计算方法如下：

氮肥农学效率[NAE, kg(grains)·kg^{-1}(N)]=(施氮区籽粒产量−对照区籽粒产量)/施氮量 (1)

氮肥偏生产力[PFP, kg(grains)·kg^{-1}(N)]=施氮区籽粒产量/施氮量 (2)

氮肥吸收利用率(NRE, %)=(施氮区地上部吸氮量−对照区地上部吸氮量)/施氮量×100 (3)

氮素生理利用率[NPE, kg(grains)·kg^{-1}(N)]=(施肥区籽粒产量−对照区籽粒产量)/(施肥区地上部氮吸收量−对照区地上部氮吸收量) (4)

氮收获指数(NHI, %)=籽粒氮吸收量/地上部氮吸收量×100 (5)

计算上述参数以不施氮肥处理(CK)为对照。

1.5 统计方法

采用 Microsoft Excel 2007 和 R 软件进行数据统计及做图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻分蘖的影响

移栽 1 周后，水稻分蘖数逐渐增加，移栽后 2~4 周期间水稻分蘖数快速增加，移栽后第 5 周，水稻分蘖数趋于稳定(图 1)。分蘖早期，不同处理的分蘖数基本一致；移栽后 2~5 周(分蘖中后期)，施氮处理的水稻分蘖数显著高于不施氮处理(P<0.05)。在分蘖后期，翁源试验点的水稻分蘖数随着施氮量的增加而增加，而在等氮条件下，不同施氮方式间没明显差异；台山试验点不同施氮处理间的分蘖数基本一致(图 1)。两地间的差异可能由于气温差异影响了水稻分蘖对施氮量的响应，台山市位于广东省的西南部，光温条件较好，早稻生长期气温相对较高，水稻分蘖早，受施氮量影响较小；翁源县位于广东省的北部，早稻生长期气温低，水稻分蘖迟缓，对施氮量较敏感。

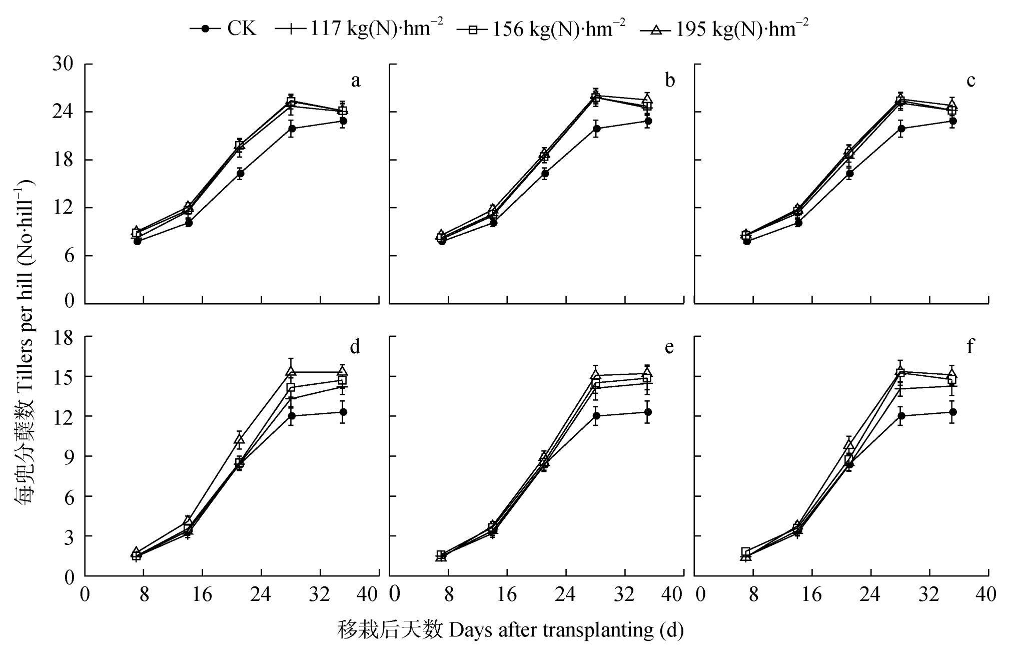


图 1 不同施氮量下常规多次施肥(CF)(a、d)和 25%控释氮肥一次施用(25%CRU)(b、e)、50%控释氮肥一次施用(50%CRU)(c、f)处理的台山(a、b、c)和翁源(d、e、f)的水稻分蘖变化动态

Fig. 1 Dynamics of tiller numbers per hill of rice in Taishan (a, b, c) and Wengyuan (d, e, f) respectively under treatments of conventional fertilization (urea, multiple application, CF) (a, d), once application of 25% controlled released urea (25%CRU) (b, e) and 50% controlled released urea (50%CRU) (c, f) with different N application rates

2.2 不同施肥处理对水稻 SPAD 值的影响

从图 2 可见，随着水稻生长，台山试验点的水稻叶片 SPAD 值基本稳定。而翁源试验点则表现出“降-升”的变化趋势。移栽后 2~3 周翁源试验点叶片 SPAD 值偏低可能是由于土壤温度较低，氮素矿化慢，水稻根系吸收能力较弱，而随着植株生长，叶片氮含量被稀释，使移栽后叶片 SPAD 值呈降低趋势；随着后期气温回升，氮素矿化速率和水稻根系

养分吸收能力提高，植株氮含量水平有所提高，从而提高了叶片 SPAD 值。两试验点的水稻叶片 SPAD 值均在移栽后 2~3 周出现低点。施用氮肥显著提高两试验点水稻叶片SPAD值(P<0.05)。在移栽后1周，不同施氮处理的水稻叶片 SPAD 值没有明显差异。随着水稻生长，水稻叶片 SPAD 值随着施氮量增加而提高，并在移栽后 5 周，常规施氮量[195 kg(N)·hm^{-2}]的水稻叶片 SPAD 值显著高于 40%减氮处理[117 kg(N)·hm^{-2}] (P<0.05)；常规分次施肥处理的叶片 SPAD 值在前期稍高于配施 CRU 一次施肥处理，但是随着水稻生长，CRU 处理的叶片 SPAD 值逐渐提高，在移栽后 3~4 周基本与常规分次施肥处理一致。其中，50%CRU 处理的叶片 SPAD 值与 25%CRU 处理的叶片 SPAD 值基本一致。

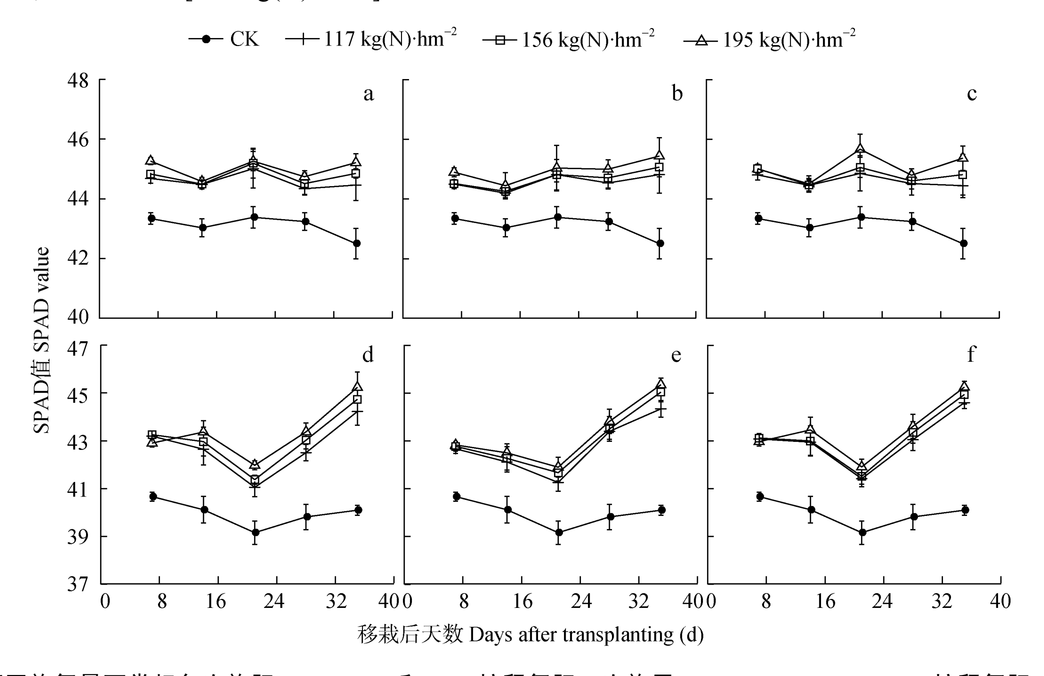


图 2　不同施氮量下常规多次施肥(CF) (a、d)和 25%控释氮肥一次施用(25%CRU)(b、e)、50%控释氮肥一次施用(50%CRU)(c、f)处理的台山(a、b、c)和翁源(d、e、f)水稻叶片 SPAD 值变化动态

Fig. 2　Dynamics of SPAD values of rice leaves in Taishan (a, b, c) and Wengyuan (d, e, f) respectively under treatments of conventional fertilization (urea, multiple application, CF) (a, d), once application of 25% controlled released urea (25%CRU) (b, e) and 50% controlled released urea (50%CRU) (c, f) with different N application rates

2.3　不同施肥处理对水稻籽粒产量及产量构成因素的影响

从表 3 可见，施氮处理显著提高水稻籽粒产量(P<0.05)，较不施氮处理增产 10.92%(台山试验点)和 12.94%(翁源试验点)，平均增产 11.93%。不同施氮处理的水稻籽粒产量也差异显著，其中 25% CRU-2 处理的水稻籽粒最高，第 2 高产处理是 50% CRU-2；台山试验点的 CF3 处理和 50%CRU-3 处理均显著低于25%CRU-2 和 50%CRU-2 处理(P<0.05)，翁源试验点的 CF1 处理显著低于 25%CRU-2 处理(P<0.05)。水稻籽粒产量随着施氮量增加呈先增加后降低的变化趋势，施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2} 时水稻籽粒产量最高。在等氮条件下，不同施氮方式的水稻籽粒产量没有显著差异。

从表 3 可见，施氮处理显著提高了台山水稻的有效穗数和每穗粒数及翁源的每穗实粒数(P<0.05)，但对结实率和千粒重没有显著影响。在等氮条件下，不同施肥的水稻有效穗数、实粒数、结实率和千粒重没有差异。台山试验点，水稻有效穗数随着施氮量的增加而提高，但差异不显著；翁源试验点不同施氮水平对水稻有效穗数没有显著影响，水稻每穗实粒数随着施氮量的增加呈现出先增加后减少的变化趋势，但不同施氮水平间差异不显著。两试验点的水稻结实率随着施氮水平的提高而逐渐降低，而不同施氮处理对水稻结实率没有显著影响。

2.4　不同施肥处理对水稻氮素吸收量和利用效率的影响

从图 3 可见，施氮处理较不施氮处理的氮素吸收累积量显著提高(P<0.05)，其中稻草氮素吸收累积量平均提高 72.01%(台山)和 94.19%(翁源)，稻谷氮素吸收累积量平均提高 27.26%(台山)和 36.95%(翁源)。不同施氮处理显著影响水稻氮素吸收累积量，其中 CF1 处理的氮素吸收累积量最高，其次是 25%CRU-1 处理。水稻的氮素吸收累积量随着施氮量的减少，且台山点减氮 40%处理的氮素吸

表 3 两试验点不同施肥处理下水稻产量及其构成因素

Table 3 Yield and its components of rice under different fertilization treatments in two experimental sites

试验点 Experimental site	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	有效穗数 Effective panicles (No.·hill^{-1})	每穗实粒数 Filled grains per panicle (grains·panicle^{-1})	结实率 Filled grain rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)
台山 Taishan	CK	6 820.65±81.84d	15.99±0.80b	125.60±2.40b	89.03±2.82a	23.23±0.49a
	CF1	7 518.42±74.28abc	17.47±0.21ab	134.30±1.57a	90.42±2.41a	22.59±0.11a
	25%CRU-1	7 615.80±42.83ab	17.41±0.58ab	135.70±1.89a	91.10±3.20a	22.72±0.21a
	50%CRU-1	7 618.20±60.21ab	17.69±0.31a	133.60±2.89a	90.37±2.40a	22.74±0.46a
	CF2	7 731.75±89.25ab	17.28±0.48ab	132.40±3.34ab	90.03±2.64a	22.56±0.87a
	25%CRU-2	7 821.52±68.70a	17.11±0.35ab	136.05±1.31a	91.13±1.52a	22.54±0.39a
	50%CRU-2	7 815.93±19.60a	17.44±0.82ab	136.05±3.58a	91.10±0.81a	22.96±0.50a
	CF3	7 156.01±80.07cd	17.22±0.12ab	131.85±4.19ab	91.39±1.75a	23.01±0.70a
	25%CRU-3	7 447.73±69.37abc	17.28±1.14ab	131.75±2.46ab	91.34±2.57a	23.13±0.55a
	50%CRU-3	7 363.96±177.82bc	17.22±0.79ab	132.05±1.79ab	89.83±4.01a	23.05±0.54a
翁源 Wengyuan	CK	9 822.39±44.77c	9.44±0.23a	179.90±13.01 b	93.04±4.58a	24.88±0.39a
	CF1	10 522.39±60.32bc	10.11±0.35a	210.40±13.96a	91.06±2.66a	23.25±1.10a
	25%CRU-1	11 115.32±269.98ab	10.35±0.26a	217.85±10.45a	91.49±0.53a	23.12±0.62a
	50%CRU-1	10 960.83±330.65ab	10.38±0.59a	205.75±10.43ab	91.46±2.00a	23.28±0.53a
	CF2	11 223.88±153.66ab	10.06±0.44a	214.60±10.94a	91.21±1.20a	23.36±1.26a
	25%CRU-2	11 800.85±293.06a	10.06±0.29a	218.85±8.54a	91.76±3.51a	23.50±0.72a
	50%CRU-2	11 295.47±17.02ab	10.34±0.38a	222.10±10.10a	91.52±1.02a	23.45±1.04a
	CF3	10 926.87±216.22abc	10.28±0.12a	209.90±8.78a	92.22±2.71a	23.43±0.43a
	25%CRU-3	10 907.58±261.97abc	10.41±0.61a	217.70±10.56a	92.44±1.19a	23.77±1.05a
	50%CRU-3	11 088.40±285.65ab	10.36±0.16a	209.20±11.53a	92.05±3.31a	23.82±1.03a

同一试验地点同列不同字母表示差异达 5%显著水平(LSD-test, P<0.05)。Different lowercase letters in the same column for the same experimental site mean significant differences at 0.05 level.

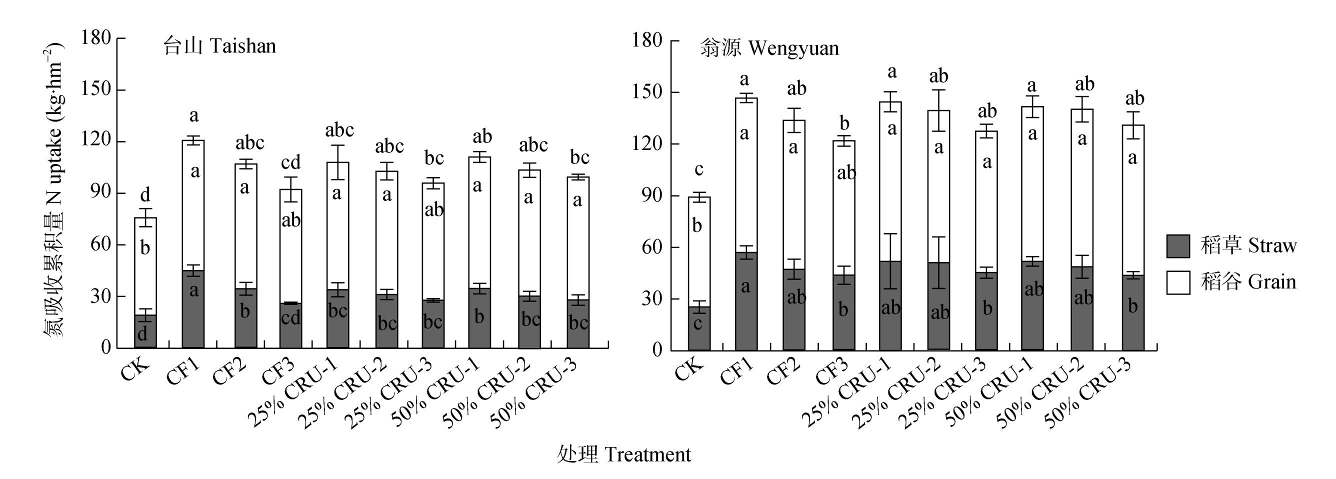


图 3 两试验点不同施肥处理对水稻氮吸收累积的影响

Fig. 3 N uptake of rice under different fertilization treatments in two experimental sites

不同字母表示差异达 5%显著水平。Significant differences among treatments are indicated by different lowercase letters based on the LSD-test (P < 0.05).

收累积量较常规施氮量处理显著降低(P<0.05)，其中常规分次施肥处理(CF3)的氮素累积量降幅最大；两试验点均为稻草的氮吸收累积量降幅最明显，控释尿素掺混施肥处理(CRU)的变幅相对较小。在等氮水平下，不同施氮方式的稻草和稻谷氮素累积量基本一致。

从表 4 可见，氮肥农学效率随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的变化趋势，当减氮 20%[施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2}]时达最大值。在等氮条件下，25%CRU 和 50%CRU 处理的氮肥农学效率比 CF 处

理分别提高 16.72%(台山)和 21.20%(翁源)、13.26%(台山)和 13.27%(翁源)，两地平均增幅分别为 14.99%和 17.23%。氮肥偏生产力则随着施氮量的增加显著降低(P<0.05)。在等氮条件下，不同施氮方式对氮肥偏生产力没有显著影响。不同施氮处理显著影响水稻的氮肥生理利用率，其中 CF1 处理的氮肥生理利用率显著低于其他处理。氮肥生理利用率随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的变化趋势。在等氮条件下，台山试验点 25%CRU 和 50%CRU 施氮方式的氮肥生理利用率均高于 CF 处理，且当施氮量为 195 kg(N)·hm^{-2} 时，其增幅分别达 105.98%(P<0.05)和 45.01%；翁源试验点，当施氮量为 195 kg(N)·hm^{-2} 时，25%CRU 和 50%CRU 施氮方式的氮肥生理利用率均显著高于 CF 处理，增幅分别达 90.48%(P<0.05)和 69.87%(P<0.05)；两地平均增幅分别为 98.22%和 57.44%。施氮处理显著降低氮收获指数(P<0.05)，且随着施氮量的增加，氮收获指数逐渐降低。当施氮量为 195 kg(N)·hm^{-2} 时，25%CRU 和 50%CRU 施氮方式的氮收获指数较 CF 处理提高 9.37%(台山)和 4.61%(翁源)、9.40%(台山)和 3.98%(翁源)，两地平均增幅分别为 6.99%和 6.69%，其中台山试验点的增幅达到显著水平(P<0.05)。不同施氮处理的氮肥吸收利用率没有差异。

表 4　两试验点不同施肥处理的水稻氮素利用效率
Table 4　N use efficiency of rice under different fertilization treatments in two experimental sites

试验点 Experimental site	处理 Treatment	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of N fertilizer (kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of N fertilizer (kg·kg^{-1})	氮肥吸收利用率 N recovery efficiency (%)	氮肥生理利用率 Physiological efficiency of N fertilizer (kg·kg^{-1})	氮收获指数 N harvest index (%)
台山 Taishan	CK	—	—	—	—	75.27±2.66a
	CF 1	6.58±0.76ab	38.56±0.76c	23.09±0.70a	15.55±1.64d	62.87±1.26c
	25%CRU-1	7.08±0.44ab	39.06±0.44c	16.50±6.94a	32.03±4.65abc	68.76±1.71b
	50%CRU-1	7.09±0.62ab	39.07±0.62c	18.30±2.79a	22.55±3.49 bcd	68.78±1.55b
	CF 2	8.73±1.12ab	48.63±1.12b	19.52±3.26a	29.48±4.12abc	68.12±2.32b
	25%CRU-2	9.29±0.86a	49.19±0.86b	17.21±4.98a	35.81±5.32a	69.69±0.87b
	50%CRU-2	9.26±0.24a	49.16±0.25b	17.73±4.22a	33.52±5.51ab	70.72±1.08ab
	CF 3	5.84±1.35b	60.64±1.35a	14.29±6.07a	20.49±1.86 cd	71.59±2.22ab
	25%CRU-3	8.31±1.17ab	63.12±1.17a	17.17±2.73a	32.09±4.47abc	71.15±1.26ab
	50%CRU-3	7.60±3.01ab	62.41±3.01a	20.37±2.55a	28.54±9.16abc	71.78±2.40ab
翁源 Wengyuan	CK	—	—	—	—	71.83±3.79a
	CF 1	6.59±0.62b	53.86±0.62c	29.69±2.45a	17.33±2.24e	61.23±1.75b
	25%CRU-1	9.63±2.77ab	57.00±2.77c	28.60±4.01a	33.01±3.17cd	64.05±1.26ab
	50%CRU-1	8.84±3.39ab	56.21±3.39c	26.84±4.24a	29.44±5.47d	63.67±1.31b
	CF 2	11.81±1.93ab	70.59±1.93b	27.98±5.17a	38.61±4.66abc	64.86±3.73ab
	25%CRU-2	15.44±3.69a	74.22±3.69b	32.30±8.63a	45.28±2.63a	63.66±4.73b
	50%CRU-2	12.26±0.21ab	71.04±0.21b	32.43±6.93a	35.52±3.82bcd	65.24±3.10ab
	CF 3	12.36±3.66ab	92.60±3.66a	27.52±3.55a	44.28±2.43ab	64.37±3.51ab
	25%CRU-3	12.20±4.44ab	92.44±4.44a	32.32±3.12a	37.33±3.48abcd	64.77±2.41ab
	50%CRU-3	13.73±4.84ab	93.97±4.84a	35.61±5.48a	36.57±3.29abcd	66.52±2.89ab

同一试验地点同列不同字母分别表示差异达 5%显著水平(LSD-test, P<0.05)。Different lowercase letters in the same column for the same experimental sites mean significant differences at 0.05 level among treatments.

2.5　不同施氮处理对土壤碱解氮含量影响

从表 5 可见，施氮显著提高土壤碱解氮含量。随着施氮量的减少，土壤碱解氮含量逐渐降低，其中台山试验点的降幅更明显。在等氮条件下，不同施氮方式对土壤碱解氮含量没有影响。

3　讨论与结论

水稻前期能否形成旺盛稳健的分蘖势，是高产水稻栽培的关键措施，其中氮素供应尤为重要[19-20]。本研究结果表明，施氮显著提高水稻分蘖数，且随着施氮量的增加，水稻分蘖数呈一定增加趋势。控释尿素养分释放缓慢，不能满足水稻分蘖旺盛期的氮素需求，水稻分蘖势较弱，分蘖数较低[11,21-23]。有研究者通过不同释放特性的控释肥掺混，调节控释尿素的养分释放曲线，从而满足水稻前期的氮需求，提高水稻分蘖数[24-25]。本研究结果表明，在等氮条件下，25%CRU 和 50%CRU 处理在分蘖旺盛期的水稻分蘖势与常规分次施肥处理基本一致。且水稻移栽后 3~4 周 25%CRU 和 50%CRU 处理的叶片 SPAD 值与常规分次施肥处理一致。由此可见，一次性配施

表 5 两试验点水稻收获后不同施肥处理的土壤碱解氮含量

Table 5 Soil available N contents after rice harvest under different fertilization treatments in two experimental sites mg·kg^{-1}

处理 Treatment	台山 Taishan	翁源 Wengyuan
CK	75.44±8.34c	88.83±88.83b
CF1	125.48±6.71a	146.23±5.68a
25%CRU-1	106.87±20.61abc	139.86±6.52a
50%CRU-1	111.13±5.44ab	126.28±34.97ab
CF2	108.73±13.03ab	133.31±8.22a
25%CRU-2	100.30±7.97abc	140.31±26.97a
50%CRU-2	102.63±7.83abc	145.28±10.83a
CF3	92.31±7.16bc	126.31±5.53ab
25%CRU-3	88.95±4.15bc	137.49±21.69a
50%CRU-3	88.97±9.35bc	128.35±9.45ab

同列不同字母分别表示差异达 5%显著水平(LSD-test, P<0.05)。Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level among treatments.

控释尿素和普通尿素可满足水稻前期分蘖旺盛阶段的氮素营养需求，为水稻高产提供重要保障。

水稻籽粒产量所需的能源物质一部分来源于茎叶储藏物质的再转移，另一部分来源于抽穗后的光合产物，因此，后期氮素供应对水稻产量形成具有重要意义[25]。研究表明，适当施用穗肥，可提高水稻成穗率、结实率及籽粒产量[26-27]。控释尿素通过对养分释放期的控制，具有肥效长、供肥稳定的特点[9]。谢春生等[13]和唐拴虎等[22]研究认为，一次性施用控释肥在水稻生长中、后期氮素供应量充足，水稻叶绿素含量较高、成穗率高。同时，也有研究者表明，一次性施用控释肥可以显著促进根系发育，构建庞大且活跃的根系系统，扩大养分吸收面积，为水稻生育后期的养分供应提供支撑[10,15]。以控释肥为载体，可延长养分供应时期，满足水稻整个生育期对氮的需求，提高水稻产量[1]。本研究结果也表明，50%CRU 和 25%CRU 处理的有效穗数、结实率、千粒重均与常规分次施肥处理相当。从产量结果来看，在等氮条件下，50%CRU 和 25%CRU 处理的水稻籽粒产量与常规分次施肥处理没有差异。由此可见，一次性配施控释尿素和普通尿素可满足水稻中后期氮素供应需求，从而保证较高的成穗率、结实率和千粒重，实现水稻稳产高产。

分蘖期、拔节至抽穗期和抽穗至成熟期是水稻氮素营养关键时期，普通尿素需要通过多次施用才能适应水稻整个生育期多峰氮素吸收规律[28]。控释尿素的养分释放曲线为持续性释放，实现养分供应的时空优化，使肥料养分供应与水稻吸收相对同步[1,29-30]。本研究结果表明，在等氮条件下，50%CRU 和 25%CRU 处理的氮素吸收累积量与常规分次施肥没有显著差异。在减氮条件下，CRU 处理的稻谷氮素累积量均稍高于常规分次施肥处理，且 50%CRU 处理的稻谷氮素累积量高于 25%CRU 处理。因为常规分次施肥处理大部分肥料集中在营养生长期，能满足前期稻草的养分累积，而后期供肥不足，致使稻谷氮素累积量大幅降低。因此，控释尿素和普通尿素配合一次性施用可满足水稻整个的氮素多峰吸收需求。

氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用效率和氮肥生理利用率反映了作物对氮肥的吸收、利用效果[7,31]。受制于栽培技术、施肥技术水平和施肥机械，我国水稻氮肥农学效率和氮肥吸收利用效率偏低，仅为 30%~35%和 10 kg·kg^{-1}[5,7,31]。大量研究表明，在水稻、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等作物上施用控释氮肥可显著提高氮肥农学效率、氮肥吸收利用效率和氮肥生理利用率[1,11,16-17,23]。本研究结果也表明，在等氮条件下，CRU 处理的氮肥农学效率和氮肥生理利用率明显高于常规分次施肥处理，其中 50%CRU 处理的增幅更大；而 CRU 处理的氮肥吸收利用效率与常规分次施肥处理基本一致。氮肥偏生产力与氮肥施用量显著相关[7]。本试验结果也表明，氮肥偏生产力与氮肥施用量显著负相关，但受施氮方式影响较小。

以降低土壤肥力为代价的作物高产栽培模式难以为继，协调作物生产和土壤肥力方能实现农业可持续发展。有研究表明，施用控释尿素能有效提高土壤耕层氮素养分含量[24]。本研究结果则表明，水稻收获后，CRU 处理的土壤碱解氮含量与常规分次施肥处理基本一致(等氮条件下)。这可能是受控释尿素养分释放期影响，本试验控释尿素释放期为 60~90 d，养分在水稻生育期内释放完全，对收获期土壤氮素养分含量没有显著影响。水稻收获后土壤碱解氮含量显著受施氮量影响，当减氮 40%[施氮量为 117 kg(N)·hm^{-2}]时，土壤碱解氮含量显著降低，影响土壤肥力。

综上所述，控释尿素与普通尿素掺混一次性施肥处理(CRU)能保证水稻营养生长阶段充分的氮素供应，维持强势分蘖势，从而建立稳健旺盛群体结构，为水稻高产稳产提供强有力支撑。当减氮 40%[施氮量为 117 kg(N)·hm^{-2}]时，氮肥吸收利用效率相对较高，但收获后土壤氮含量显著降低；常规施氮量[施氮量为 195 kg(N)·hm^{-2}]下，水稻氮累积量大幅增加，但氮肥利用率和产量则最低；当减氮

20%[施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2}]时，水稻产量最高，且 25%CRU 控氮施肥处理的氮肥利用率最高。因此，综合考虑作物的生长、产量效应、氮素吸收、氮肥利用效率及土壤肥力状况，在本研究中 25%控释氮肥掺混一次性施用施氮量为 156 kg(N)·hm^{-2} 的施肥方式是一种较优的氮肥运筹模式。

参考文献 References

[1] 徐明岗，李菊梅，李冬初，等．控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]．植物营养与肥料学报，2009，15(5): 1010–1015
Xu M G, Li J M, Li D C, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1010–1015

[2] 王桂良，崔振岭，陈新平，等．南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J]．应用生态学报, 2015, 26(8): 2337–2345
Wang G L, Cui Z L, Chen X P, et al. Reactive nitrogen loss pathways and their effective factors in paddy field in southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2337–2345

[3] 汤建东，叶细养，饶国良，等．广东省稻田肥料施用现状及其合理性评估[J]．土壤与环境, 2002, 11(3): 311–314
Tang J D, Ye X Y, Rao G L, et al. Current status and the rationality of rice fertilization in Guangdong Province[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 311–314

[4] 徐富贤，熊洪，谢戎，等．水稻氮素利用效率的研究进展及其动向[J]．植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1215–1225
Xu F X, Xiong H, Xie R, et al. Advance of rice fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1215–1225

[5] 彭少兵，黄见良，钟旭华，等．提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]．中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103

[6] 朱兆良，金继运．保障我国粮食安全的肥料问题[J]．植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273

[7] 于飞，施卫明．近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]．土壤学报, 2015, 52(6): 1311–1324
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311–1324

[8] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462

[9] 樊小林，刘芳，廖照源，等．我国控释肥料研究的现状和展望[J]．植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463–473
Fan X L, Liu F, Liao Z Y, et al. The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 463–473

[10] 唐拴虎，徐培智，陈建生，等．一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]．植物营养与肥料学报，2007, 13(4): 591–596
Tang S H, Xu P Z, Chen J S, et al. Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza satava* L.)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 591–596

[11] 符建荣．控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]．植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 145–152
Fu J R. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and N recovery[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(2): 145–152

[12] 鲁艳红，聂军，廖育林，等．不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]．水土保持学报, 2016, 30(2): 155–161
Lu Y H, Nie J, Liao Y L, et al. Effects of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 155–161

[13] 谢春生，唐拴虎，徐培智，等．一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 177–182
Xie C S, Tang S H, Xu P Z, et al. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 177–182

[14] 唐拴虎，杨少海，陈建生，等．水稻一次性施用控释肥料增产机理探讨[J]．中国农业科学，2006，39(12)：2511–2520
Tang S H, Yang S H, Chen J S, et al. Studies on the mechanism of single basal application of controlled-release fertilizers for increasing yields of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(12): 2511–2520

[15] 唐拴虎，徐培智，张发宝，等．一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 63–69
Tang S H, Xu P Z, Zhang F B, et al. Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 63–69

[16] 李伟，李絮花，李海燕，等．控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]．作物学报，2012，38(4): 699–706
Li W, Li X H, Li H Y, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 699–706

[17] 杨雯玉，贺明荣，王远军，等．控释尿素与普通尿素配施对冬小麦氮肥利用率的影响[J]．植物营养与肥料学报，2005, 11(5): 627–633
Yang W Y, He M R, Wang Y J, et al. Effect of controlled-release urea combined application with urea on nitrogen utilization efficiency of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 627–633

[18] 鲁如坤．土壤农业化学分析方法[M]．北京：中国农业科技出版社, 2004: 430–472
Lu R K. The Analytical Methods for Soil and Agrochemis-

try[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2004: 430–472

[19] 张洪程, 吴桂成, 吴文革, 等. 水稻"精苗稳前、控蘖优中、大穗强后"超高产定量化栽培模式[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2645–2660
Zhang H C, Wu G C, Wu W G, et al. The SOI model of quantitative cultivation of super-high yielding rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2645–2660

[20] Mae T. Physiological nitrogen efficiency in rice: Nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential[J]. Plant and Soil, 1997, 196(2): 201–210

[21] Azeem B, KuShaari K, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. Journal of Controlled Release, 2014, 181: 11–21

[22] 唐拴虎, 谢春生, 孙小文, 等. 水稻施用控释肥料生长效应研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(1): 149–151
Tang S H, Xie C S, Sun X W, et al. Effects of controlled-release fertilizers on rice growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(1): 149–151

[23] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 494–500
Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 494–500

[24] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808–815
Li M, Guo X S, Ye S Y, et al. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(4): 808–815

[25] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4892–4902
Xing X M, Li X C, Ding Y F, et al. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(24): 4892–4902

[26] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23–29
Pan S G, Huang S Q, Zhai J, et al. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice[J]. Soils, 2012, 44(1): 23–29

[27] 刘立军, 王志琴, 桑大志, 等. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 23(3): 46–50
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z, et al. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Sciences Edition, 2002, 23(3): 46–50

[28] 刘立军, 徐伟, 吴长付, 等. 实地氮肥管理下的水稻生长发育和养分吸收特性[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 167–173
Liu L J, Xu W, Wu C F, et al. Characteristics of growth, development and nutrient uptake in rice under site-specific nitrogen management[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(2): 167–173

[29] 蒋曦龙, 陈宝成, 张民, 等. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 215–220
Jiang X L, Chen B C, Zhang M, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 215–220

[30] 唐拴虎, 郑惠典, 张发宝, 等. 控释肥料养分释放规律及对水稻生长发育效应的研究[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(4): 9–12
Tang S H, Zheng H D, Zhang F B, et al. Nutrient release of controlled-release fertilizer and its effects on rice growth and development[J]. Journal of South China Agricultural University: Natural Science Edition, 2003, 24(4): 9–12

[31] 王秀斌, 徐新朋, 孙刚, 等. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1279–1286
Wang X B, Xu X P, Sun G, et al. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and nitrogen use efficiency of double cropping rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1279–1286